

⑬ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑪ **DE 3237843 A1**

⑤ Int. Cl. 3:  
**G01B7/14**  
G 01 P 3/42

⑳ Aktenzeichen:  
㉔ Anmeldetag:  
㉕ Offenlegungstag:

P 32 37 843.2-52  
8. 10. 82  
28. 4. 83

㉚ Innere Priorität: 09.10.81 DE 31402283

㉚ Erfinder:

gleich Anmelder

㉛ Anmelder:

Weh, Herbert, Prof. Dr.-Ing.; Brauckmann, Wilfried,  
Dipl.-Ing.; Kaupert, Gerhard, Dipl.-Ing., 3300 Braunschweig,  
DE

Patent Eigentum

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤ **Einrichtung zur berührungslosen linearen Messung des Abstandes und dessen zeitliche Ableitung zwischen einem Gegenstand und einem ferromagnetischen Körper**

DE 3237843 A1

DE 3237843 A1

Patentansprüche

1. Einrichtung zur berührungslosen linearen Messung des Abstandes zwischen einem Gegenstand und einem ferromagnetischen Material sowie zur direkten Messung der zeitlichen Ableitung der Abstandsgröße kombiniert in einem als Meßaufnehmer ausgebildeten Magneten (1,2,3,4,5), der zusammen mit dem ferromagnetischen Meßobjekt (15) durch Gestalt und Anordnung mehrere vom Abstand s beeinflussbare Magnetkreise (7,8,9) ausbildet, gekennzeichnet durch
  - a) zwei getrennte nebeneinander angeordnete Körper (K1,K2) mit jeweils einer Polendfläche (P3,P4), einem ausgeprägten Pol im mittleren Bereich der Körper (P2) und einem weiteren ausgeprägten Pol an den den Polendflächen abgewandten Enden wenigstens eines der Körper (P1) und durch Permanentmagnete zur Erzeugung je eines Flusses über die beiden ausgeprägten Pole einerseits (7) sowie den mittleren ausgeprägten Pol und die beiden Endpole und das Meßobjekt andererseits (8), wobei die Permanentmagnete so angeordnet sind, daß sich im mittleren Pol (P2) ein Differenzfluß ausbildet
  - b) eine auf den mittleren Pol (P2) angeordnete Induktionsmeßsonde (13)
  - c) eine den zum mittleren Pol (P2) zugehörigen Schenkel umschließende Induktionsspule (14), die vom Differenzfluß (9) durchsetzt wird.
2. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als Werkstoff für die Permanentmagnete (4,5) Samarium-Kobalt ( $\text{SmCo}_5$ ) verwendet wird.
3. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Referenzluftspalt (10), der dem ausgeprägten Pol an den den Polendflächen (P3,P4) abgewandten Enden zugehörig ist, verstimmbar ist.

4. Einrichtung nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n - z e i c h n e t , daß eine mit der Induktionsmeßsonde (13) verbindbare elektronische Rechenschaltung zur Linearisierung und Ermittlung der vom Abstand  $s$  (6) abhängigen Spannung  $U_s$  angewandt wird.
5. Einrichtung nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n - z e i c h n e t , daß eine mit der Induktionsspule (14) verbindbare Rechenschaltung zur Linearisierung und Ermittlung der von der zeitlichen Ableitung des Abstandes  $\dot{s}$  abhängigen Spannung  $\dot{U}_s$  angewandt wird.
6. Linearisierungsschaltung nach Anspruch 4 oder 5, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß zur Erzielung einer linear vom Luftspalt (6) abhängigen Ausgangsspannung  $U_s$  für die Messung des Abstandes  $s$  das normierte Signal  $y$  mit einer Rechenschaltung gemäß der gebrochen rationalen Funktion

$$x = \frac{-y \cdot a_0}{y \cdot a_1 - a_2} - a_3 \quad (26)$$

in den linearen Spalt-Abbildungswert  $x \triangleq U_s$  umgerechnet wird und daß zur Messung der zeitlichen Ableitung des Abstandes  $\dot{s}$  die normierte Spannung  $\dot{y}$  der Spule (14) sowie die bereits bekannte lineare Abstandsgröße  $x \triangleq U_s$  mit einer Rechenschaltung gemäß der Funktion

$$\dot{x} = (b_1 + b_2 \cdot x + b_3 \cdot x^2) \cdot \frac{\dot{y}}{b_0} \quad (29)$$

in den linearen Wert der zeitlichen Ableitung des Abstandes  $\dot{x} \triangleq \dot{U}_s$  umgerechnet wird und daß die Rechenschaltungen mit analogen Verstärkerelementen und/oder mit digital arbeitenden Rechen- und Speicherbausteinen aufgebaut werden.

7. Verfahren nach Anspruch 6 zur Ermittlung der Parameter  $a_0$

bis  $a_3$  in Gleichung (26) und  $b_0$  bis  $b_3$  in Gleichung (29),  
dadurch gekennzeichnet, daß die gebrochen rationale Übertragungsfunktion der Induktionsmeßsonde durch die empirische Gleichung

$$y = y_0 + \frac{x - x_0}{A + B \cdot x} \quad (24)$$

beschrieben wird und deren Koeffizienten A und B nach der bekannten Methode der Mittelwerte aus den n Meßwerten der einmalig aufgenommenen Meßkennlinie der Hallspannung bestimmt werden und daß die Gleichung (24) in die Gleichung (26) mit den Koeffizienten  $a_0$  bis  $a_3$  umgerechnet wird, und daß für die Linearisierung der zeitlichen Ableitung des Abstandes  $\dot{s}$  Gleichung (24) differenziert und auf die Form in Gleichung (29) mit den Koeffizienten  $b_0$  bis  $b_3$  gebracht wird.

8. Einrichtung nach den Ansprüchen 1 und 4, dadurch gekennzeichnet, daß innerhalb des Meßaufnehmers an einem der Körper (K1, K2) ein NTC-Widerstand (35) befestigt ist, dessen temperaturabhängige Widerstandsänderung in Zusammenhang mit linearen Verstärkern für eine Meßaufnehmerbedingte Temperaturkompensation ausgenutzt wird.

B 10 10 83

- 4 -

3237843

P a t e n t a n m e l d u n g

"Einrichtung zur berührungslosen linearen Messung des Abstandes  
und dessen zeitliche Ableitung zwischen einem Gegenstand und  
einem ferromagnetischen Körper"

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf eine Meßeinrichtung für die berührungslose, lineare Messung des Abstandes zwischen einem Gegenstand und einem ferromagnetischen Material sowie zur direkten Messung der zeitlichen Ableitung der Abstandsgröße kombiniert in einem als Meßaufnehmer ausgebildeten permanenterregten Magneten.

Eine bekannte Meßeinrichtung der genannten Art (DE-OS 22 26 101) arbeitet mit Wechselstrommagneten. Sie bildet über Flußmessungen nur den Weg ab und es muß ständig die notwendige Erregerleistung bereitgestellt werden.

Weitere Möglichkeiten zur berührungsfreien Messung eines Abstandes wurden bereits in vielfältiger Weise untersucht und eingesetzt. Eine Aussage über die Änderungsgeschwindigkeit längs des Abstandes ist bei diesen Verfahren nicht in direkter Weise gegeben.

Beispielsweise beschreibt die DE-OS 22 65 046 eine Anordnung, bei der positive und negative Induktionshalbwellen detektiert werden, die DE-OS 29 16 289 eine Anordnung, bei der das Spalt-signal durch die Auswertung eines im Meßluftspalt gesendeten HF-Signals gewonnen wird und die U.S.-Patentschrift 38 65 043 eine Anordnung, die mit einer festen Resonanzfrequenz arbeitet. Nach DE-OS 21 57 011 wird lediglich der Abstand aus Induktion und Durchflutung eines Elektromagneten errechnet.

Aufgabe der Erfindung ist eine Weiterentwicklung einer Einrichtung der eingangs erwähnten Art, dergestalt, daß sie ohne Zuführung von Erregerleistung arbeitet und Ausgangssignale für den Abstand  $s$  und der zeitlichen Abstandsänderung  $\dot{s}$  erzeugt, die beispielsweise in Linearisierungsschaltungen verarbeitbar sind.

Diese Aufgabe wird gelöst durch die im kennzeichnenden Anspruch 1 herausgestellten Merkmale. Zweckmäßige Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche.

Die Erfindung ist in Figuren beispielsweise veranschaulicht und anhand derer beschrieben.

Es zeigt:

Fig. 1 den Aufbau eines erfindungsgemäßen Meßaufnehmers und die Wirkungsweise der induktiven Meßwerterfassung,

Fig. 2 das vereinfachte Ersatzschaltbild des magnetischen Kreises im Meßaufnehmer,

Fig. 3 die Strukturbilder der Rechenschaltungen für die Linearisierung des Abstandssignals und des Meßwertes der zeitlichen Ableitung des Abstandes,

Fig. 4 die Schaltung zur Kompensation des Einflusses der Umgebungstemperatur auf die Meßwerte und

Fig. 5 die statisch aufgenommene Meßkennlinie für den Abstand  $s$ .

Der Meßaufnehmer gemäß Fig. 1 besteht aus zwei getrennten, nebeneinander angeordneten Körpern (K1, K2). Beide Körper weisen an der einen Seite des Meßaufnehmers jeweils eine Polendfläche (P3, P4) auf. Der eine Körper (K1) im ausgeführten Beispiel hat im mittleren Bereich einen ausgeprägten Pol P2 und einen weiteren (P1) an der von der Polendfläche abgewandten Seite und ist aus magnetisch gut leitendem Material (z.B. Weicheisen) gefertigt.

Der daneben angeordnete Körper (K2) setzt sich in Form einer Schichtung aus Permanentmagneten (4,5) und magnetisch leitenden Elementen (3,2) zusammen. Dabei grenzt ein Magnet (P4) an die Polendfläche. Darüber angeordnet ist das Flußleitelement (3), dessen seitliche Fläche an die Stirnseite des mittleren Poles (P2) von Körper (K1) grenzt.

Als weitere Schichtteile folgen der zweite Permanentmagnet (4) und das Flußleitelement (2), welches das von den Polendflächen abgewandte Ende bildet und mit einer Seite gemeinsam mit der Stirnfläche des ausgeprägten Poles (P1) vom Körper (K1) den Referenzluftspalt (10) bildet.

Die Magnetisierungsrichtung und räumliche Anordnung der Magnete ist so gewählt, daß sich je ein Fluß über die beiden ausgeprägten Pole (P1,P2) einerseits (7) und über den mittleren Pol (P2) die beiden Endpole und das Meßobjekt andererseits (8) ausbildet, wobei sich im mittleren Pol (P2) ein Differenzfluß ergibt.

Abweichend vom ausgeführten Beispiel in Fig. 1 können die Permanentmagnete (4,5) grundsätzlich in jeweils einem der Körper (K1,K2) und oder in beiden Körpern eingesetzt werden, wenn die genannten Flußverläufe damit erzielt werden.

Der Referenzluftspalt (10) an der Stirnfläche des äußeren Poles (P1) ist verstimmbar, z.B. durch eine Stellschraube (12). Im Meßluftspalt (11) an der Stirnfläche des mittleren ausgeprägten Poles (P2) wird die Induktion als Maß für den Abstand  $s$  (6) mit einer Induktionssonde (z.B. Hallgenerator (13)) gemessen.

Die den Schenkel des mittleren Poles (P2) umschließende Spule (14) liefert das Signal für die zeitliche Änderung  $\dot{s}$  des Abstandes (6) zwischen Meßaufnehmer und Meßobjekt.

Ein Temperaturfühler (z.B. NTC-Widerstand (35)), der innerhalb des Meßaufnehmers an einem der Körper (K1,K2) befestigt ist, ermöglicht die Kompensation des Einflusses der Temperatur auf die Meßsignale.

Die Signale der Meßfühler (14,13,35) werden den Linearisierungs- und Temperaturkompensationsschaltungen zugeführt, an deren Ausgängen die Spannungen  $U_s$  und  $\dot{U}_s$  linear abhängig vom Abstand  $s$  bzw. der zeitlichen Änderung  $\dot{s}$  zur Verfügung stehen.

Die Wirkungsweise der induktiven Meßwerterfassung veranschau-



licht Fig. 1.

Ordnet man die Polendflächen (P3,P4) des Meßaufnehmers über ein magnetisch leitendes Meßobjekt an, so ist der veränderliche Abstand  $s$  zwischen Meßaufnehmer und Meßobjekt die einzige variable Luftspaltgröße, die eine Flußverstimmung im gesamten Kreis ermöglicht.

Auf diese Weise kann der magnetische Fluß (9) als Maß für den Abstand  $s$  und die zeitliche Änderung des Flusses (9) als Abbild der zeitlichen Ableitung  $\dot{s}$  gelten.

Ursache für das Entstehen der magnetischen Flüsse sind die Feldstärken der Permanentmagnete (4) und (5).

Von besonderer Bedeutung für die Erfindung ist die Anwendung von Samarium-Kobalt-Magneten ( $\text{SmCo}_5$ ). Diese Magnete weisen im Entmagnetisierungsquadranten eine lineare Kennlinie auf und können daher ersatzweise als Zweipol, bestehend aus konstanter Durchflutung  $\Theta$  und festem magnetischen Innenwiderstand  $R_i$  angegeben werden.

Durch die Anwendung derartiger Magnete ist die im folgenden beschriebene analytische Beschreibung des Übertragungsverhaltens der Meßeinrichtung möglich.

Die Magnete gleichen sich in ihrer Größe und Magnetisierung. Sie sind so angeordnet, daß sich im mittleren Pol (P2) die magnetischen Flüsse (7) und (8) entgegengesetzt überlagern und der resultierende Fluß (Differenzfluß (9)) im Meßluftspalt (11) die Meßinduktion bestimmt. Dies hat den Vorteil, daß dem eigentlichen Meßsignal keine Gleichanteile überlagert sind. Die Anordnung gewährleistet so eine hohe Empfindlichkeit und Meßauflösung bis in den  $\mu$ -Meterbereich hinein.

Der Referenzluftspalt (10) kann auf den zu messenden Abstand  $s$  derart abgestimmt werden, daß für einen vorgegebenen Wert  $s$  die Meßinduktion Null wird.

Jede Auslenkung des Meßobjektes aus dieser Lage bewirkt eine Änderung der Flußanteile im mittleren Pol (P2).

Der Differenzfluß (9) und proportional dazu die Induktion im Meßluftspalt (11) kann daher grundsätzlich als Abbild des Abstandes ausgewertet werden. Da Abstand  $s$  und die zeitliche

Änderung  $\dot{s}$  in direktem Zusammenhang stehen, kann die zeitliche Änderung  $\dot{s}$  über die Ableitung des Differenzflusses (9) gemessen werden.

Durch die erfindungsgemäße direkte Messung der zeitlichen Änderung  $\dot{s}$  werden Fehler, die bei einer Differentiation des Abstandes mit elektronischen Hilfsmitteln zwangsläufig entstehen, vermieden.

Maßgebend für das Übertragungsverhalten der Meßsonde ist der Zusammenhang zwischen dem magnetischen Fluß und dem Abstand  $s$ .

Ohne Berücksichtigung der Streuflußanteile kann wie in Fig. 2 dargestellt der Zusammenhang über die Flußverläufe in einfacher Weise nach dem Ohmschen Gesetz des magnetischen Kreises ermittelt werden. In der Analogie zum elektrischen Strömungsfeld werden die Samarium-Kobaltmagnete in dem Ersatzschaltbild nach Fig. 2a jeweils durch eine magnetische Spannungsquelle mit einer konstanten Durchflutung  $\Theta$  und einem festen magnetischen Innenwiderstand  $R_i$  ersatzweise angegeben. Die magnetischen Widerstände der Luftspalte  $R'_v$ ,  $R'_s$  und  $R_m$  vervollständigen das ESB.

Nach Zusammenfassung der Widerstände zu  $R_v$ ,  $R_s$  und  $R_m$  (Fig. 2b) kann die Übertragungsfunktion (17) des Meßaufnehmers aufgestellt werden,

$$B_m \sim \Phi_m = \frac{\Theta (R_s - R_v)}{R_v \cdot R_m + R_s (R_v + R_m)} \quad (17)$$

die mit Hilfe der Normierungen (18), (19)

$$y = \frac{\Phi_m}{1Vs} \quad , \quad x = \frac{s}{1mm} \quad (18), (19)$$

und nach Zusammenfassung der konstanten Größen in die im folgenden näher zu erläuternde normierte Übertragungsfunktion (20)

$$y = \frac{a \cdot x + b}{c \cdot x + d} \quad (20)$$

überführt werden kann. Hierbei bedeuten  $y$  der normierte Meßwert und  $x$  der normierte Abstand.

Für eine sehr genaue Bestimmung der Parameter  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $d$  müssen auch die bisher vernachlässigten Streuanteile und Eisenverluste des Meßaufnehmers in die Rechnung einbezogen werden.

Dies geschieht mit Hilfe der Methode der Mittelwerte und einer statisch aufgenommenen Meßkennlinie gemäß Fig. 5.

Im vorliegenden Fall wählt man einen Punkt  $P_0(x_0, y_0)$  auf der Meßkurve nach Fig. 5 und substituiert:

$$\text{Substitution: } Y = \frac{x - x_0}{y - y_0} \quad (21)$$

$$X = x \quad (22)$$

Die Zusammenhänge in den Substitutionsgleichungen (21), (22) sind so gewählt, daß  $Y$  und  $X$  entsprechend der Gleichung (23)

$$Y = A + B \cdot X \quad (23)$$

linear miteinander verknüpft sind.

Für den weiteren Verlauf der Rechnung genügt die Bestimmung der Konstanten  $A$  und  $B$ , die durch sukzessives Einsetzen der Meßwerte aus Fig. 5 in Gleichung (23) bestimmt werden. Die gewonnene empirische Formel zur Beschreibung der normierten Meßkennlinie wird dann in der Gestalt der Gleichung (24)

$$y = y_0 + \frac{X - x_0}{A + B \cdot x} \quad (24)$$

geschrieben.

Nach Kenntnis von A und B wird die inverse Funktion (25)

$$x = g(y) \quad (25)$$

gebildet und man erhält den in Gleichung (26)

$$x = \frac{-y \cdot a_0}{y \cdot a_1 - a_2} - a_3 \quad (26)$$

beschriebenen Zusammenhang.

Wird der normierte Meßwert  $y$  mit Hilfe einer analogen oder digitalen Rechenschaltung gemäß Gleichung (26) umgewandelt, kann auf diese Weise eine direkte, quantitative Aussage über den Luftspalt gemacht werden.

In ähnlicher Weise wird bei der Linearisierung der Geschwindigkeitserfassung verfahren.

Zunächst wird die Übertragungsfunktion der Meßsonde (Gleichung (24)) differenziert. Die Lösung in Gleichung (28)

$$\dot{y} = \frac{b_0 \cdot \dot{x}}{b_1 + b_2 x + b_3 \cdot x^2} \quad (28)$$

beschreibt die funktionale Abhängigkeit des mit der Spule (14) ermittelten Meßwertes  $\dot{y}$  von der Geschwindigkeit  $\dot{x}$  und dem Abstand  $x$ . Aufgelöst nach  $\dot{x}$  erhält man die linearisierte Geschwindigkeit in Gleichung (29):

$$\dot{x} = (b_1 + b_2 x + b_3 x^2) \cdot \frac{\dot{y}}{b_0} \quad (29)$$

Fig. 3 zeigt die Strukturbilder der Rechenschaltungen, die sowohl digital als auch analog verifiziert werden können. Die Parameter werden abhängig von den  $n$ -Meßwerten mit einem programmierbaren Kleinrechner bestimmt.

In Fig. 4 ist die elektronische Schaltung für die Temperatur-

kompensation des Meßsignals gemäß Anspruch 7 dargestellt. Die für die Wegmessung in dem ausgeführten Beispiel eingesetzten Hallgeneratoren aus Indiumarsenid prägen der Meßsonde eine nahezu linear mit steigender Temperatur abfallende Kennlinie auf. Entsprechend muß die Heißleiterkennlinie im gewünschten Temperaturbereich linearisiert werden. Dies geschieht durch Parallelschalten eines Festwiderstandes  $R_p$ , dessen Wert nach Gleichung (30) bestimmt wird.

$$R_p = R_{TM} \cdot \frac{B - 2 \cdot T_M}{B + 2 \cdot T_M} \quad (30)$$

$R_{TM}$ : Widerstand des NTC bei mittlerer Temperatur  $T_M$   
 $B$  : B-Wert des NTC

Die Widerstände  $R_e$  und  $R_v$  in Fig. 4 werden auf die Temperaturkennlinie der Meßsonde wie folgt abgestimmt: Die Übertragungsfunktion der Schaltung aus Fig. 4b beschreibt Gleichung (31)

$$\frac{U_0}{U_e} = - \frac{R_v}{R_e + R(\vartheta)} \quad (31)$$

Gleichung (32)

$$\left| \frac{U_0}{R_v} \right| = \left| \frac{U_e}{R_e + R(\vartheta)} \right| = \text{konstant} \quad (32)$$

enthält die Bedingung, daß die Ausgangsspannung  $u_a$  unabhängig von den temperaturbedingten Schwankungen der Eingangsspannung  $u_e$  ihren Wert beibehält. Diese Forderung wird eingehalten, wenn  $u_e$  und  $(R_e + R(\vartheta))$  sich gleichermaßen temperaturabhängig ändern.

Bei optimaler Kompensation gilt der Faktor  $a$  in Gleichung (33)

$$\frac{u_e(\vartheta_2)}{u_e(\vartheta_1)} = a = \frac{R_e + R(\vartheta_2)}{R_e + R(\vartheta_1)} \quad (33)$$

$\vartheta_1$ : untere Grenztemperatur

$\vartheta_2$ : obere Grenztemperatur

entsprechend für den Quotienten aus kleinstem Eingangswiderstand ( $R_e + R(\vartheta_2)$ ) und dem Maximalwert ( $R_e + R(\vartheta_1)$ ).

Aus Gleichung (33) folgt das Ergebnis für den Widerstand  $R_e$ :

$$R_e = R(\vartheta_1) \frac{a}{1-a} - R(\vartheta_2) \frac{1}{1-a} \quad (34)$$

$R_v$  wird so gewählt, daß die Verstärkung der Schaltungsanordnung bei Raumtemperatur den Wert eins annimmt.

-14-  
Leerseite

Nummer:  
Int. Cl.<sup>3</sup>:  
Anmeldetag:  
Offenlegungstag:

3237843  
G01B 7/14  
8. Oktober 1982  
28. April 1983

-19-

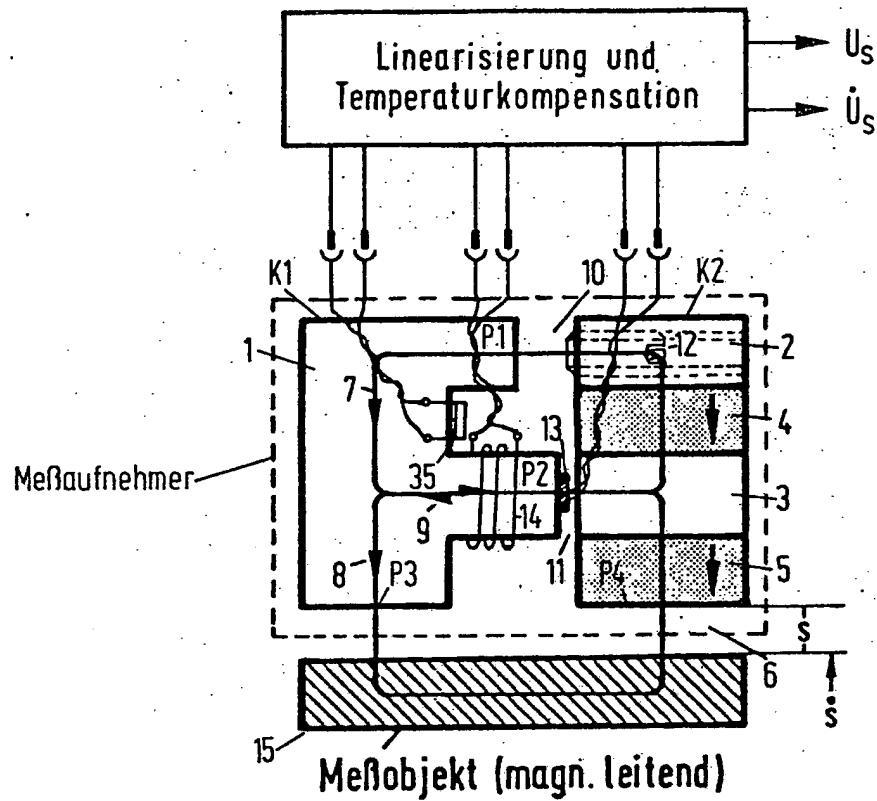


Fig. 1



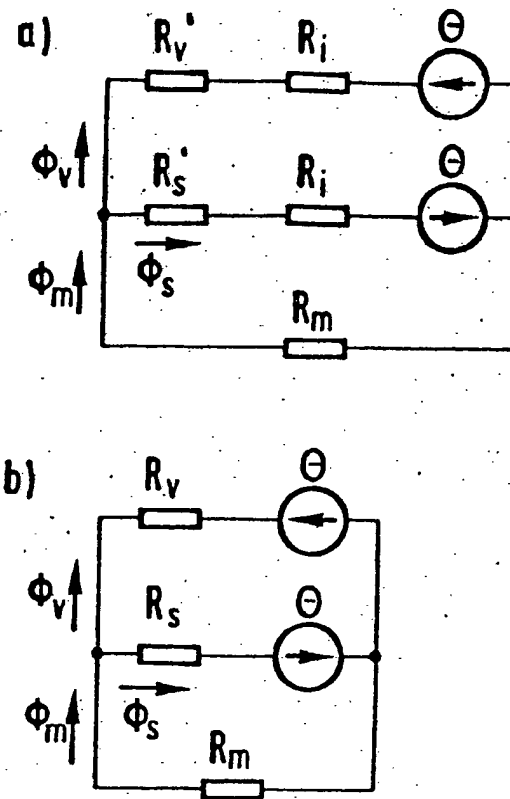
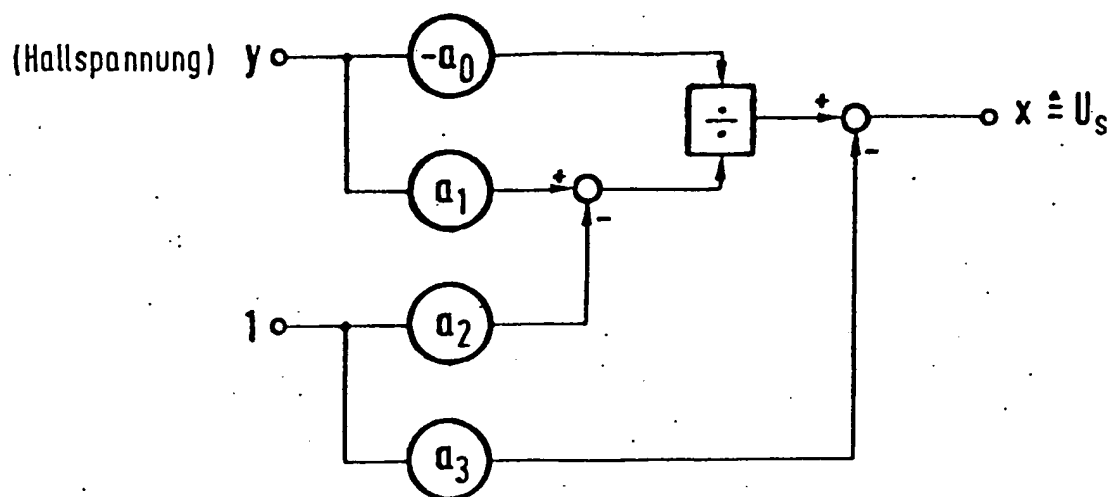


Fig. 2

a) Abstand

$$-16 \cdot x = \frac{-y \cdot a_0}{y \cdot a_1 - a_2} - a_3 \quad (26)$$



b) zeitliche Ableitung des Abstandes

$$\dot{x} = (b_1 + b_2 \cdot x + b_3 \cdot x^2) \cdot \frac{\dot{y}}{b_0} \quad (29)$$

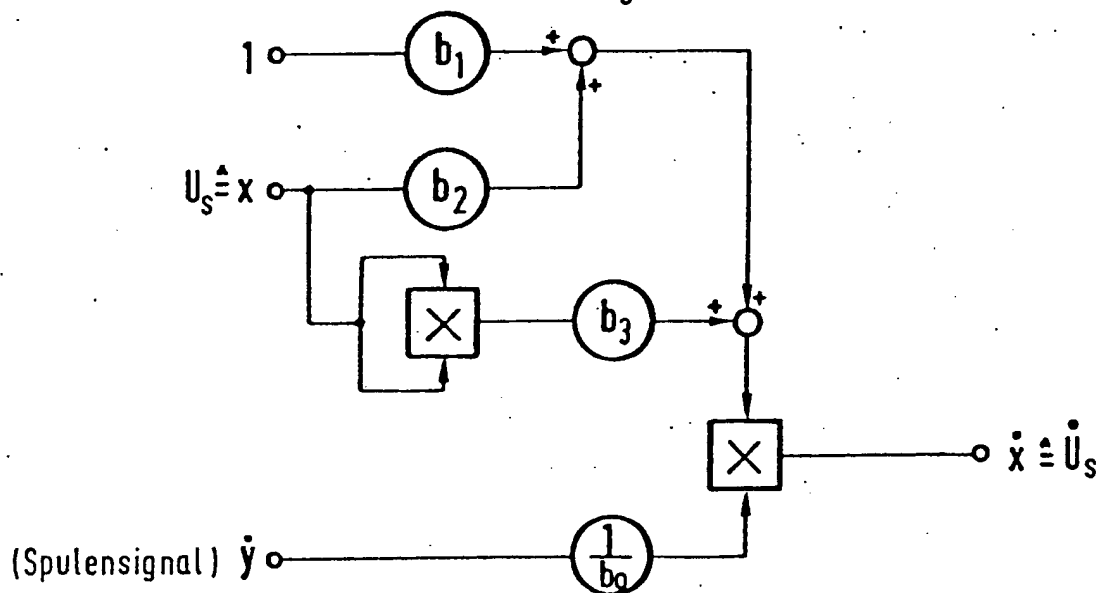
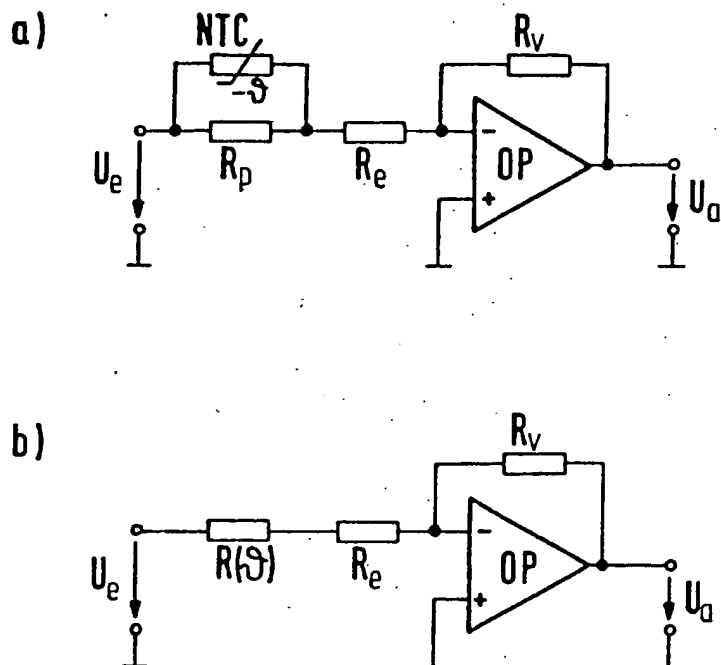
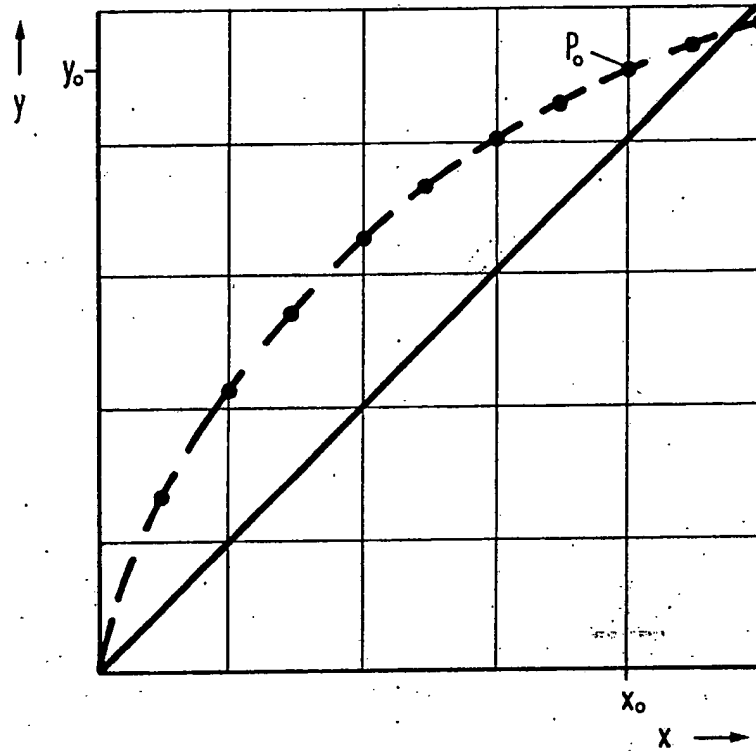


Fig. 3



Schaltung : Temperaturkompensation

Fig. 4



Statische Meßkennlinie

--- : nichtlinear  
 — : Linear

Fig. 5